

光ファイバによるトンネル支保の連続的な応力計測および解析的検討

宮石 雅子¹・小泉 悠²・黒川 紗季³
宮嶋 保幸⁴・今井 道男⁵・川端 淳一⁶

¹正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目 19-1)
E-mail: miyaishi@kajima.com

²正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目 19-1)
E-mail: koizumyu@kajima.com

³正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目 19-1)
E-mail: kurokaws@kajima.com

⁴正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目 19-1)
E-mail: miyaj@kajima.com

⁵正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目 19-1)
E-mail: michio@kajima.com

⁶正会員 鹿島建設株式会社 土木管理本部 (〒107-8348 東京都港区赤坂六丁目 5-11)
E-mail: kawabata-j@kajima.com

山岳トンネル工事では、掘削中の地山状況に応じて、安全性・経済性の観点から最適な支保構造を選定することが重要である。選定された支保の妥当性を確認するため、鋼製支保工や吹付けコンクリートの応力を計測する支保応力測定（計測 B）が実施される。しかし、現在の支保応力計測は、ひずみゲージや有効応力計を用いたポイント型の計測であり、地質が複雑に分布する場合、局所的な応力集中を見落とし、結果的に過大な変状や地山の崩壊に至る可能性がある。そこで、トンネルの支保応力を連続的に計測することを目標に、分布型光ファイバひずみ計測技術の適用性を現場試験により検証した。また、計測結果をトンネル掘削のシミュレーション解析結果と対比し、解析モデルの精度向上に資することを確認した。

Key Words: distributed fiber optic sensing, support stress measurement, FE analysis

1. はじめに

山岳トンネル工事では、掘削中の地山状況に応じて、安全性・経済性の観点から最適な支保構造を選定することが重要である。選定された支保の妥当性を確認するため、鋼製支保工や吹付けコンクリートの応力を計測する支保応力測定（計測 B）が実施される。しかし、現在の支保応力計測は、図-1の左に示すようなひずみゲージや有効応力計を用いたポイント型の計測であり、地質が複雑に分布する場合、局所的な応力集中を見落とし、結果的に過大な変状や地山の崩壊に至る可能性がある。したがって、トンネル断面内の支保応力を連続的かつ高精度に計測する必要がある。そこで、トンネルの支保応力を連続的に計測することを目標に、分布型光ファイバひずみ計測技術の適用性を現場試験により検証した。また、

計測結果が従来のポイントデータから分布データへ変わること、数値シミュレーションによる掘削の再現解析の精度を向上できるといった効果が期待できる。そこで、FEM解析による2次元のトンネル掘削解析において、支保の応力分布が解析と計測で整合するよう逆解析を行い、解析モデルの精度向上に資するか検証した。

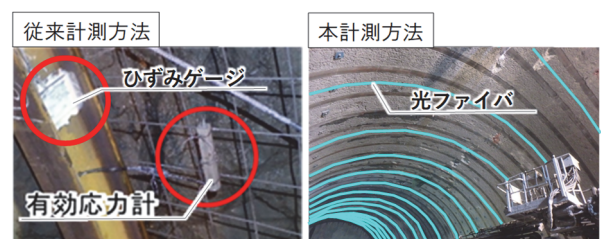


図-1 光ファイバによる応力計測

2. 光ファイバによるトンネル支保応力計測

(1) 実証試験箇所の地質状況

今回適用試験を実施したAトンネルの地質縦断面図を図-2に示す。掘削対象となる岩種は、凝灰質泥岩の互層で、凝灰質泥岩、砂岩および礫岩からなる。掘削には、ロードヘッダーが用いられた。終点側坑口にほど近い、T.D.2066.4mに、光ファイバ計測断面を設置した。計測断面の切羽写真を写真-1に示す。計測断面の地質状況は、比較的硬質な砂質泥岩互層に、一部軟質な頁岩が混じっていた。土破りは約26mであり、湧水状況としては、切羽面全体が湿る程度であった。地山変位計測の結果としては、内空変位で1～3mmとわずかであった。

(2) 使用した光ファイバケーブル

光ファイバ内を透過する光は、温度とひずみの変化に反応し、発生する後方散乱光の中心周波数が変化する。その周波数差分を解析することで、光ファイバケーブル（以下、光ケーブルと表記）沿いのひずみ・温度の分布計測が可能となる。図-3¹⁾は、光ファイバに発生した引張ひずみに伴い、同区間で中心周波数が $\Delta\nu_b$ だけシフトする状況を示している。また、ひずみを計測するためには、中心周波数の変化から温度変化分を取り除く必要があるため、本計測では、表-1に示す温度とひずみの両者に反応する光ケーブルと、温度変化のみに反応する温度計測用光ケーブルを併用し、温度とひずみを分離することとした。なお、既報²⁾の室内試験により、表-1中の光ケーブル③と計測対象となるコンクリートとのひずみの追従性は良好であることが確認されている。

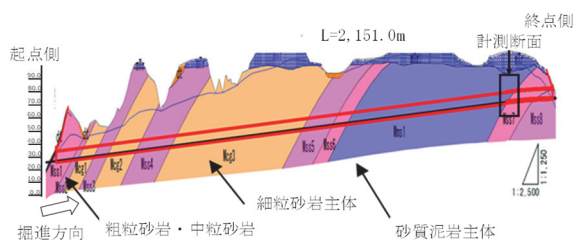


図-2 地質縦断面図

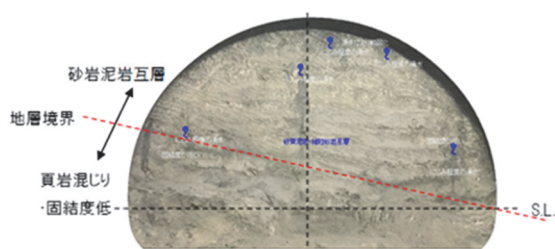


写真-1 計測断面の切羽写真

(3) 光ケーブルの実装方法

今回実施した現場適用試験では、施工中のトンネル内で①吹付けコンクリート内部の温度変化、②鋼製支保工応力、③吹付けコンクリート応力の3項目について計測を行った。光ケーブルおよび従来のポイント型計器のレイアウトを図-4に示す。光ファイバによる計測データと比較すべく、従来の支保応力の計器である有効応力計・ひずみゲージ・熱電対を上半3カ所（左肩・天端・右肩）に設置した。

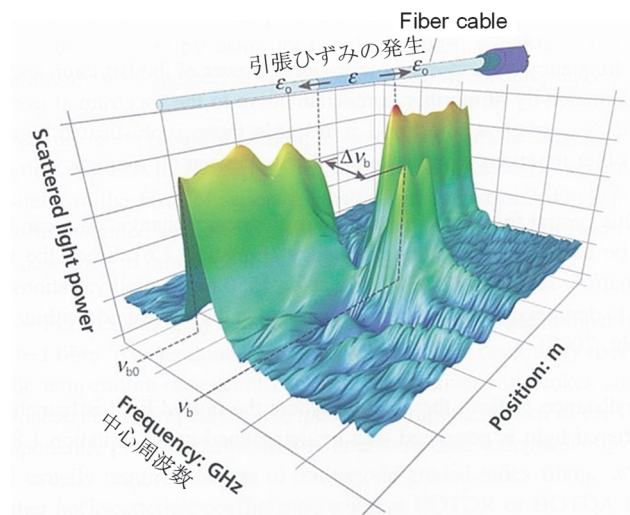


図-3 ひずみと散乱光の中心周波数シフト¹⁾

表-1 使用した光ケーブル

	①	②	③
計測項目	温度のみ	温度、ひずみ	温度、ひずみ
敷設箇所	吹付けコンクリート	鋼製支保工	吹付けコンクリート
全体写真			
拡大写真			

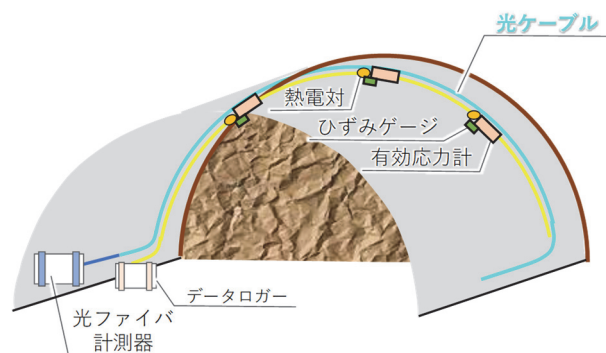


図-4 光ケーブルおよび従来計器のレイアウト

光ケーブルの敷設方法の内、鋼製支保工への貼付け方法については、写真-2に示すように、建込み前の鋼製支保工の上下フランジの内側全周（内空側、地山側）に、エポキシ系接着剤を用いて光ケーブルを貼り付けた。吹付けコンクリート内への敷設方法については、写真-3に示すように、事前に鋼製支保工に一定間隔でガイダンス治具を設置した。支保工建込み後、治具の孔に光ケーブルを通し、その上から吹付けコンクリートを施工した。計測期間は、計測データが収束するまで、1回/時間の頻度で計測を継続した。



写真-2 鋼製支保工への貼付け

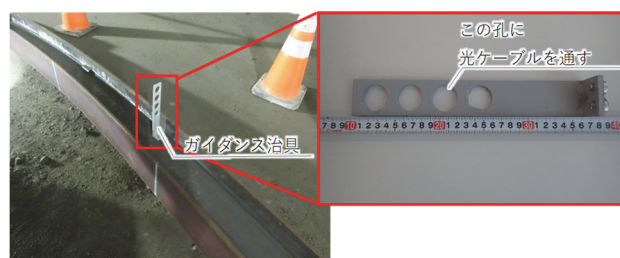


写真-3 吹付けコンクリート中の光ケーブル敷設

(4) 計測結果

今回の光ファイバ計測では、高精度かつ連続的にデータ取得可能なレイリー散乱光³⁾を用いた計測方法を採用し、計測間隔 5 cm、空間分解能 10 cmとした。従来計器を設置した位置での光ファイバ計測結果と従来計器での計測結果を比較した。

a) 吹付けコンクリート内部の温度変化

温度計測用光ケーブルにより計測された吹付けコンクリートの温度分布を図-5に示す。側壁に比較して天端の温度が高いことが確認できた。これは温度が高い空気ほど密度が小さく、比較的高温の空気が天端部に滞留したためだと考える。次に、温度計測用光ケーブルと熱電対の比較結果を図-6に示す。初期の温度上昇は、セメントの水和反応によるもので、その後、温度変化は収束した。両者間では絶対値で最大 3℃程度の差異がみられるものの、変化の傾向はよく整合しているといえる。

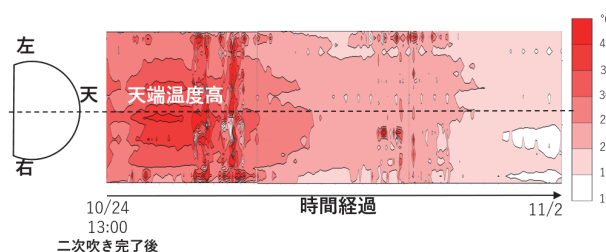


図-5 吹付けコンクリートの温度分布

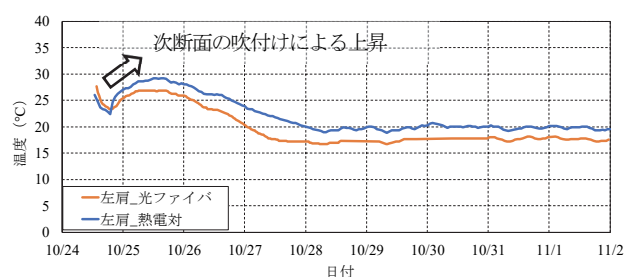


図-6 吹付けコンクリート内部の温度推移（左肩）

b) 鋼製支保工と吹付けコンクリートの応力

温度計測の整合性が確認できたため、中心周波数のシフト量のうち、温度変化分を除去することで、ひずみ変化分を抽出した。各支保に発生する応力は、ひずみに弾性係数を乗じることで算出した。鋼材の弾性係数は210,000 MPaとし、時々刻々変化する吹付けコンクリートの弾性係数については、谷ら⁴⁾による吹付けコンクリートを模擬した供試体の室内圧縮試験結果に基づいて、図-7に示すようにバイリニアで近似した。また、鋼製支保工に発生するひずみにおいて、温度変化に伴って鋼材に引張ひずみが発生するため、温度変化分に鋼材の線膨張係数（11.7 $\mu\text{ε}/^{\circ}\text{C}$ ）をかけた値を用いて補正し、掘進に伴う力学ひずみのみを抽出した。

図-8、図-9に光ファイバ計測によって得られた空間連続的な、鋼製支保工（内空側）と吹付けコンクリートの圧縮応力分布の時間変化を示す。同図より、時間経過とともに、左肩部での応力の増大が確認できた。次に、図-10、図-11に左肩部における光ケーブルと従来計器（ひずみゲージ・有効応力計）の圧縮応力の比較結果を示す。同図より、鋼製支保工・吹付けコンクリートともに光ケ

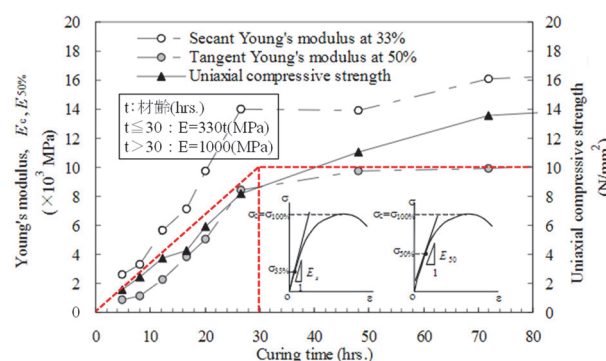


図-7 吹付けコンクリート供試体の弾性係数の時間推移⁴⁾（文献4）に加筆・修正）

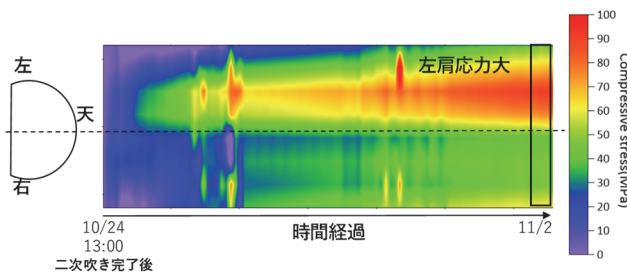


図-8 鋼製支保工に発生する応力コンター

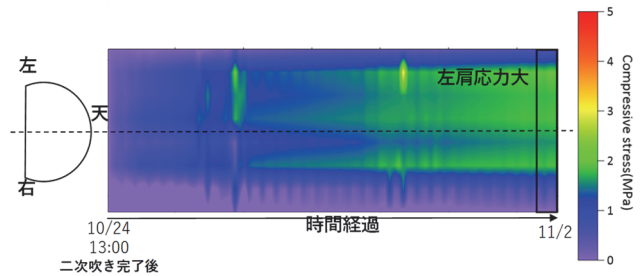


図-9 吹付けコンクリートに発生する応力コンター

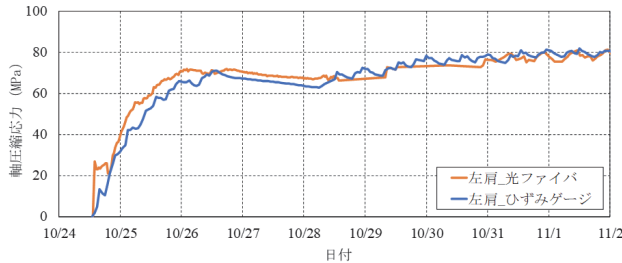


図-10 鋼製支保工の応力比較 (左肩)

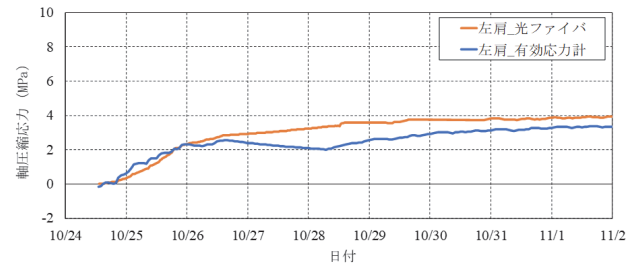


図-11 吹付けコンクリートの応力比較 (左肩)

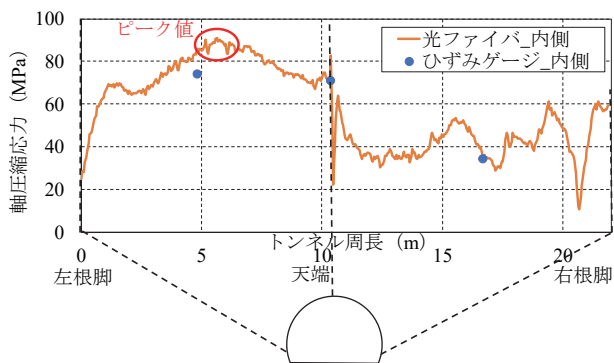


図-12 鋼製支保工の応力分布 (9日後 抽出)

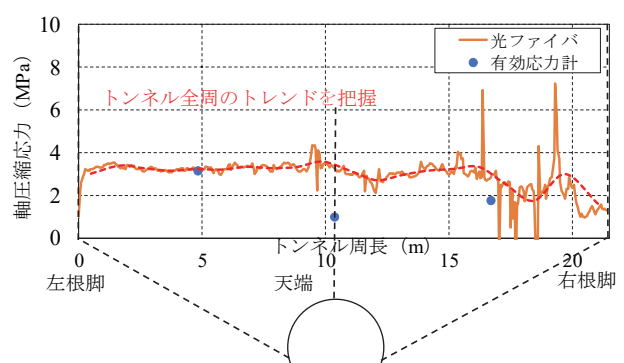


図-13 吹付けコンクリートの応力分布 (9日後 抽出)

ケーブルと従来計器がよく整合することが確認できた。また、図-12、図-13に計測開始から9日後の応力値を縦軸に、トンネル周長を横軸として、鋼製支保工（内空側）と吹付けコンクリートの応力分布を示す。同図より、分布型光ファイバ計測により、従来のポイント型計測では捉えられなかった全体的なモードと、左側の応力のピーク値を取りこぼすことなく計測できることが示された。鋼製支保工においては、鋼材の降伏応力 245MPa に対し、発生応力は最大で90MPa程度であり、支保の合理化が図れる可能性が示唆された。吹付けコンクリートにおいては、発生応力が全体的に小さく、計測精度の評価が困難であるため、引き続き、計測試験で検証を重ねていく必要がある。今後は、現場導入に向け、光ケーブルの設置方法・光ファイバ計測のデータ処理技術に関して更なる改善を進めていく所存である。

3. FEMによる計測断面の掘削再現解析

光ファイバ計測により支保応力が空間連続的に得られることが示されたが、トンネル掘削の予測解析に用いら

れる FEM においても、要素ごとに空間連続的な支保応力が出力される。これより、FEM 等の数値解析の結果と、光ファイバによる連続的な計測データとを同化させることで、数値解析の精度向上が図れると考えられる。計測を行った切羽は、砂岩泥岩互層と頁岩混じりに二分でき、それぞれの変形係数をパラメトリックに変化させながら、2次元のトンネル掘削解析を複数行い、支保の応力分布が解析と計測で整合するよう逆解析を行った。

(1) 解析条件

解析には、有限要素解析ソフト GTSNX (midas 社) を使用した。計測を行った切羽は、写真-1に示すように比較的硬質な砂岩泥岩互層と軟質な頁岩混じりに二分でき、FEM で、図-14のようにモデル化した。トンネルモデルの寸法を表-2に、解析入力値を表-3に示す。また、表-4に解析ステージの概要を示す。以上の条件で掘削をモデル化し、変形係数、鉛直地圧（単位体積重量）、側圧比をパラメトリックに変化させながら、2次元のトンネル掘削解析を複数行い、鋼製支保工の応力分布が解析と計測で整合するよう逆解析を行った。

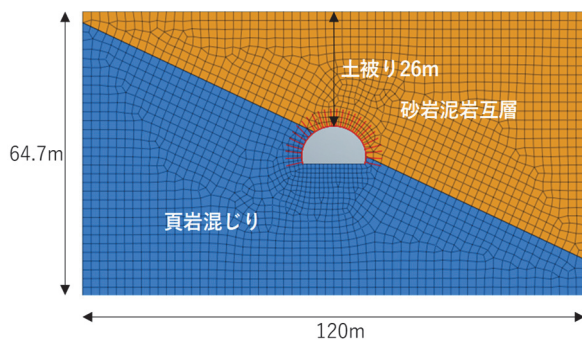


図-14 解析モデル

表-2 モデル寸法

掘削幅	15.4m
掘削高	8.7m
鋼製支保工	200H
吹付厚	250mm
RB長	6m

表-3 解析入力値

項目	単位	地山		鋼製支保工	吹付けコン
		砂岩泥岩互層	頁岩		
変形係数	E	MPa	500	200	210,000
単位体積重量	γ	kN/m ³	20	78	23
ポアソン比	ν		0.35	0.25	0.2
粘着力	c	Mpa	0.5	0.2	
内部摩擦角	ϕ	deg	35	30	
側圧比	K_0		0.5		

表-4 解析ステージ

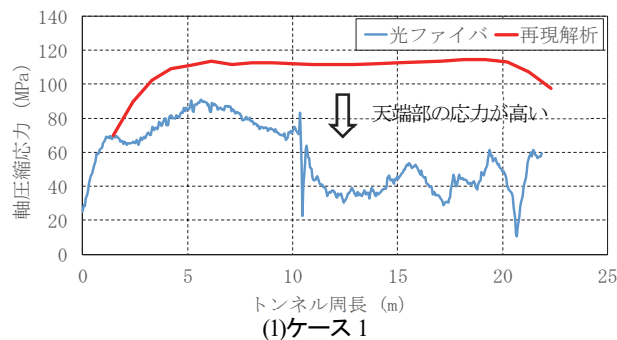
ステージ	実施事項
1	初期応力解析
2	上半掘削（40%応力解放）
3	上半支保
4	下半掘削（40%応力解放）
5	下半支保

(2) 解析結果

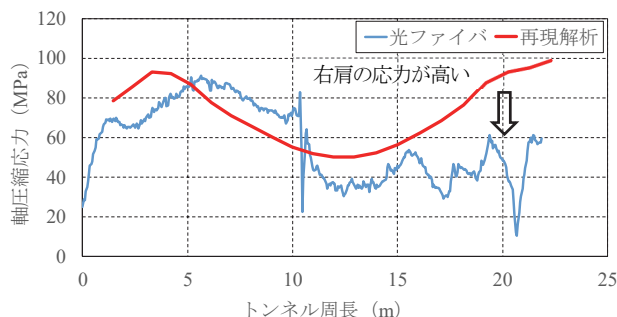
パラメトリックスタディにおける各解析ケースの変形係数、単位体積重量、側圧比の入力値を表-5に示す。当初値として、砂岩泥岩互層・頁岩泥混じりに共にDⅠ級を想定した。また、鋼製支保工内側の圧縮応力について、それぞれの解析結果を図-15に示す。まず、ケース1の結果より天端部の軸力を下げる必要があるため、側圧比で調整した。次に、ケース2の結果より右側の応力を下げる必要があるため、砂岩泥岩互層をDⅠ級、頁岩をDⅡ級として、左右の変形係数に差を持たせた。最後に、ケース3の結果より全体の応力レベルをあげるため、単位体積重量で調整した。最終的に、ケース4の入力値で、光ファイバ計測値と解析値の整合性を得ることができた。計測結果がポイントではなくて分布で得られたことで、逆解析の過程においてパラメータの調整を最短かつ適格

表-5 解析ケース

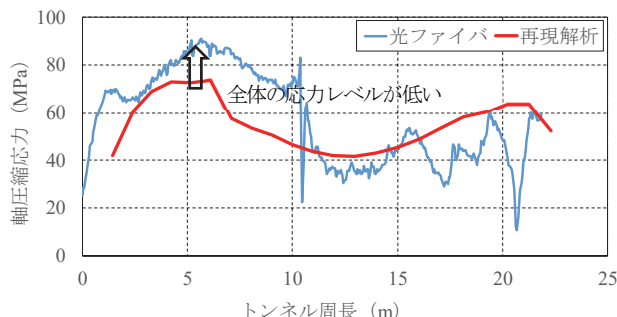
ケース	変形係数E (MPa)		単位体積重量 γ (kN/m ³)	側圧比
	砂岩泥岩互層	頁岩		
1	500	500	22	1
2	500	500	22	0.5
3	500	200	16	0.5
4	500	200	20	0.5



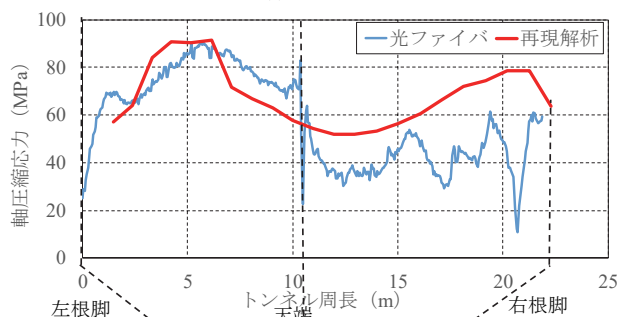
(1) ケース 1



(2) ケース 2



(3) ケース 3



(4) ケース 4

図-15 解析結果（鋼製支保工内側応力）

に行うことができた。

このようにして、モデルの精度を高めると、異なる支保パターンで施工した場合の掘削シミュレーションの信頼性も高まると考えられる。今回の計測において、実際の施工は DII パターン（鋼製支保工のサイズ：200H）であったが、これを DI パターン（鋼製支保工のサイズ：150H）とした場合の解析結果を図-16 に示す。DI パターンとしても、鋼製支保工の発生応力は最大 120MPa 程度であり、鋼材の降伏応力 245MPa に対して余裕があるため、支保の合理化が図れるものと考えられる。

一方、天端沈下量・内空変位量において、解析結果と A 計測を比較した結果を表-6 に示す。解析値が計測値よりも 2 倍ほど大きな結果となり、応力値と変位量とともにフィッティングさせるためには、今後さらなる解析モデルの検討が必要である。したがって、今回は 2 層のモデルとしたが、今後より詳細なモデル化にも取り組む所存である。

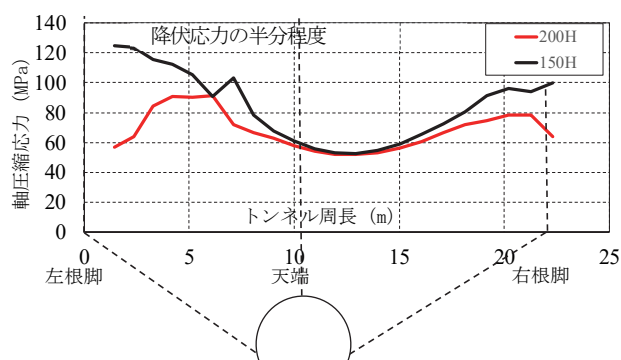


図-16 150H とした場合の解析値

表-6 変位量の比較

(mm)	天端沈下	左水平	右水平
計測	6.8	2.7	4.8
解析	13	7.4	3.5

4. おわりに

本報では、トンネルの支保応力を連続的に計測することを目指し、分布型光ファイバひずみ計測技術の適用性を現場試験により検証した。また、計測結果が従来のポイントデータから分布データへ変わることで、数値シミュレーションによる掘削の再現解析の精度を向上できるといった効果が期待でき、FEM 解析による 2 次元のトンネル掘削解析において、支保の応力分布が解析と計測で整合するよう逆解析を行い、解析モデルの精度向上に資するか検証した。得られた知見を以下に示す。

- ・ 分布型光ファイバひずみ計測技術により、トンネルの支保応力が連続的に計測され、その値は従来計器による計測値と整合することが確認できた。
- ・ ひずみを連続的に計測できることから、従来のポイント型計測では捉えられなかったピーク値を取りこぼすことなく計測できた。ピーク値を確実に取得できることから、支保の妥当性をより精度良く評価できるといえ、トンネル工事の安全性・経済性の向上に貢献できると考えられる。
- ・ 数値シミュレーションによる掘削の再現解析において、光ファイバ計測によりトンネル全周のモードが把握できたことによって、パラメータの調整を最短かつ適格に行うことができた。
- ・ 再現解析の精度を高めることで、異なる支保パターンで施工した場合の掘削シミュレーションの信頼性も高まり、支保の合理化が図れると考えられる。

今後は、現場導入に向け、光ケーブルの設置方法・光ファイバ計測のデータ処理技術に関して更なる改善を進めていく所存である。さらに、掘削シミュレーション解析において、パラメータ同定を自動で行う技術の開発に取り組む所存である。

参考文献

- 1) Cedric Kechavarzi, Kenichi Soga, Nicholas de Battista, Loizos Pelecanos, Mohammed Elshafie and Robert Mair: Distributed Fibre Optic Strain Sensing for Monitoring Civil Infrastructure, p.246, 2016.
- 2) 黒川紗季, 岡田侑子, 小泉悠, 升元一彦, 今井道男, 川端淳一: 光ファイバによるトンネル支保の応力計測に関する室内検討, 第 75 回年次学術講演会概要集, 2020.
- 3) 岸田ら, SMF におけるひずみと温度が識別できるハイブリッド分布測定システムの開発, 信学技報, OFT2012-59 (2013).
- 4) 谷卓也, 青木智幸, 小川豊和, 武田均, 藤井義明: 弱材齢トンネル吹付けコンクリートの粘弾性特性に関する研究, 大成建設技術センター報, Vo.40, pp.15-1~8, 2007.

(2020. 8. 7 受付)

SPATIALLY CONTINUOUS MEASUREMENT OF ROCK SUPPORT STRESS ON TUNNEL BY OPTICAL FIBER AND ANALYTICAL STUDIES

Masako MIYAISHI, Yu KOIZUMI, Saki KUROKAWA, Yasuyuki MIYAJIMA
Michio IMAI and Junichi KAWABATA

In tunnel construction, it is important to apply the optimal support structure from the viewpoint of safety and economics, depending on the ground condition during excavation. In order to confirm the validity of the selected support, support stress measurement (measurement B) is conducted, for example, by measuring the stress of steel support and shotcrete. However, the present supporting stress measurement is a point type measurement using a strain gauge and an effective stress meter, and when the geology is complicated, the local stress concentration is overlooked, resulting in excessive ground deformation, which may lead to the collapse of tunnel support. Therefore, the applicability of the distributed optical fiber strain measurement technology was verified by field tests with the goal of continuously measuring the supporting stress of tunnel. In addition, tunnel excavation reproduction analysis was conducted using the optical fiber measurement data.